



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Ciências Sociais e Humanas

**O Efeito da Profundidade no Arrasto
Hidrodinâmico em Natação
Análise Efectuada Através da Dinâmica Computacional
de Fluidos**

Rui Jorge Ramos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Ciências do Desporto
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Daniel A. Marinho

Covilhã, Junho de 2011

Dedicatória

“So close no matter how far
Couldn’t be much more from the heart
Forever trust in who we are
And nothing else matters.”

Não estar presente, não significar estar ausente.

Sei que sempre desejou o melhor para mim, e, por isso, sempre me esforcei para dar o meu melhor.

Obrigado Ziquinha (Antonieta Ramos)

Agradecimentos

A realização desta dissertação é resultado de um trabalho contínuo ao longo dos últimos meses. A finalização desta etapa não teria sido possível sem a contribuição de algumas pessoas. Expresso assim publicamente o meu agradecimento:

Ao Professor Dr. Daniel Marinho por todo o suporte e acompanhamento na minha formação prestado ao longo deste ano. O seu incentivo, partilha de ideias e sobretudo partilha de um vasto e infindável conhecimento foram fulcrais para a realização deste trabalho. Obrigado por tudo.

Ao Professor Dr. Mário Marques tenho a agradecer toda a confiança depositada assim como a partilha de conhecimento.

Ao Professor Dr. Vishveshwar Mantha pela receptividade demonstrada e colaboração prestada na realização das simulações.

A todos os professores que se cruzaram na minha vida académica, pois, sem a sua colaboração na minha formação, não estaria nesta etapa.

À minha amiga Nádia Gameiro, pelo companheirismo, amizade e por todos os bons momentos passados durante todo este percurso académico. Foram momentos fantásticos os quais me ajudaram a passar de uma forma mais ligeira, todo este percurso.

A todos os meus amigos em geral, que estiveram presentes durante todo o meu percurso académico.

Ao meu padrasto, Fernando Teixeira por toda a boa disposição e alegria transmitida. É sempre bom ter por perto alguém que nos faz rir e que nos transmite uma enorme energia positiva.

Nada disto seria possível sem a minha mãe, Alda Ramos. As palavras aqui escritas não poderão sequer dar uma ideia do quanto lhe estou grato pela minha vida. Foi graças a todo o seu apoio e incentivo que cheguei até aqui. Obrigado Mamy.

À Andreia Marialva, amiga, companheira, amante, namorada, mulher. Obrigado pelo apoio incondicional, sem ele tudo teria sido mais difícil. A tua simples presença faz com que o mau pareça bom e o bom seja excelente. A possibilidade de caminharmos juntos durante a nossa formação foi uma enorme mais valia. Obrigado Anjinha.

Resumo

O objectivo deste presente estudo passou por analisar o efeito da profundidade e da velocidade de nado na variação da força de arrasto hidrodinâmico (D) e do coeficiente de arrasto (C_D), durante a fase de deslize subaquático passivo, após as partidas e viragens. Para esta análise, foi utilizada a metodologia de Dinâmica Computacional de Fluidos, através do *software* ANSYS® FLUENT®, tendo sido modelado um modelo tridimensional real de um nadador de elite na posição hidrodinâmica fundamental. Este modelo foi obtido através de uma tomografia axial computadorizada (TAC) completa do corpo. As simulações foram efectuadas para as profundidades de 0, 0.25, 0.50, 0.75 e 1.0 metros, com três velocidades representativas diferentes, 1.5, 2.0 e 2.5 m/s. Os resultados obtidos revelaram que o arrasto hidrodinâmico diminuiu à medida que a profundidade aumentou, havendo uma tendência para a estabilização deste valor após os 0.75 m de profundidade. Contudo, a 0 m de profundidade, o valor de arrasto hidrodinâmico é menor do que a 1 m de profundidade. Verificou-se também que um aumento da velocidade levou a um aumento da força de arrasto e a uma diminuição do coeficiente de arrasto hidrodinâmico. Estes dados parecem sugerir que a selecção da profundidade adequada para a realização do deslize subaquático deve ser uma preocupação central dos nadadores e treinadores.

Palavras-chave

Forças, Simulação Numérica, Deslize Subaquático, Partidas, Viragens.

Abstract

The aim of this study was analyze the effect of depth and swimming speed variation of the hydrodynamic drag force (D) and the drag coefficient (C_D), during the passive underwater slide after starts and turns. For this analysis, was used the methodology of Computational Fluid Dynamics, through the software ANSYS® FLUENT®, having been modeled a real three-dimensional model of an elite swimmer in the streamline position. This model was obtained through a computerized axial tomography of the full body. The simulations were conducted for depths of 0, 0.25, 0.50, 0.75 and 1.0 meters, with three different representing speeds, 1.5, 2.0 and 2.5 m/s. The results showed that the hydrodynamic drag decreased as depth increased, with a trend toward stabilization of this value after the 0.75 m deep. However, the 0 m depth, the vale of drag is less that 1 m deep. There was also an increase in speed led to an increased drag force and a decrease in hydrodynamic drag coefficient. These data seem to suggest that the selection of the appropriate depth for the realization of the gliding slide should be a central concern of the swimmers and coaches.

Keywords

Forces, Numerical Simulation, Underwater Slide, Starts, Turns.

Parte do presente trabalho foi suportado pelas seguintes publicações:

1. Marinho, D.A., Ramos, R., Mantha, V., Barbosa, T.M., Rouboa, A., & Silva A.J. (2010). Computational Fluid Dynamics: The Analysis of Drag Coefficient During the Gliding Phase. In K. Jones & A. Harwood (Eds.), *UK SEM 2010 Conference* (pp.44). London, England: BASEM Education Management Group.
2. Ramos, R.J., & Marinho, D.A. (2011). The Influence of Depth in the Variation of Hydrodynamic Drag: A Brief Review. *International Journal of Motor Learning & Sport Performance*, 1, 64-68.
3. Ramos, R.J., Marinho, D.A., Mantha, V., Barbosa, T.M., Rouboa, A., Ribeiro, J., Machado, L., Vilas-Boas, J.P., & Silva, A.J. (2011). Dinâmica Computacional de Fluidos: Análise do Coeficiente de Arrasto Durante o Deslize Subaquático. In *XXIV Congresso Técnico Científico da Associação Portuguesa de Natação e XI Congresso Ibérico*. Ílhavo, Portugal: APTN.
 - a. 3º Prémio - “Melhor Comunicação Livre”, na área do Treino Desportivo.

Índice

Dedicatória	ii
Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vi
Índice.....	viii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	x
Lista de Acrónimos	xi
Introdução	1
Revisão da Literatura	3
O Fluído.....	3
Arrasto Hidrodinâmico	4
Arrasto	4
Coeficiente de Arrasto	7
Avaliação do Arrasto.....	7
Arrasto Passivo - Deslize Subaquático	8
Arrasto Hidrodinâmico e Profundidade	9
Componentes do Arrasto	10
Dinâmica Computacional de Fluidos	10
Métodos	12
Modelo Tridimensional	12
Modelo da Dinâmica Computacional de Fluidos	13
Avaliação das Componentes do Arrasto	14
Resultados	15
Discussão	20
Referências Bibliográficas	25

Lista de Figuras

Figura 1. Representação esquemática da secção transversal.....	6
Figura 2. Resultante da combinação do arrasto e deslize. Adaptado de Vorontsov & Rumyantsev (2000).	8
Figura 3. Efeito da profundidade no arrasto total (adaptado de Toussaint et al., 2002).	9
Figura 4. Esquema representativo da sequência de trabalho em DCF.....	11
Figura 5. Nuvem de pontos obtida através da TAC.	12
Figura 6. Modelo tridimensional do nadador, após a nuvem de pontos ter sido processada pelo <i>software</i> GAMBIT®.....	12
Figura 7. Modelo tridimensional do nadador.	13
Figura 8. Domínio da simulação. Pista de uma piscina com 2 m de profundidade, 2 m de largura e 25 m de comprimento. Modelo a 1 m de profundidade.	13
Figura 9. Simulação do <i>software</i> ANSYS® FLUENT® com o modelo do nadador na posição de 0 m de profundidade. Representação dos valores de velocidade em ambiente ar/água, para uma velocidade de 2 m/s. Pontos/Zonas a vermelho indicam valores mais elevados de velocidade, enquanto os pontos/zonas a azul indicam valores mais baixos de velocidade de escoamento do fluido, no domínio considerado.	14
Figura 10. Representação gráfica do coeficiente de arrasto total em função da profundidade, para as velocidades de 1.5, 2 e 2.5 m/s.....	16
Figura 11. Representação gráfica da força de arrasto total em função da profundidade, para as velocidades de 1.5, 2 e 2.5 m/s.	16
Figura 12. Representação gráfica do coeficiente de arrasto de pressão em função da profundidade, para as velocidades de 1.5, 2 e 2.5 m/s.....	17
Figura 13. Representação gráfica da força de arrasto de pressão em função da profundidade, para as velocidades de 1.5, 2 e 2.5 m/s.....	17
Figura 14. Representação gráfica do coeficiente de arrasto de fricção em função da profundidade, para as velocidades de 1.5, 2 e 2.5 m/s.....	18
Figura 15. Representação gráfica da força de arrasto de fricção em função da profundidade, para as velocidades de 1.5, 2 e 2.5 m/s.....	18
Figura 16. Representação gráfica do coeficiente de arrasto em função da profundidade, para a velocidades 2 m/s, em cinco diferentes estudos, Vennell et al. (2006), Bixler et al. (2007), Marinho et al. (2009a), Ribeiro (2010) e no presente estudo.	20
Figura 17. Variação percentual da força de arrasto hidrodinâmico em diferentes posições de deslize subaquático. Adaptado de Vorontsov & Rumyantsev (2000).	22

Lista de Tabelas

Tabela 1. Valores de coeficiente de arrasto e força de arrasto para o arrasto total e contribuição do arrasto de pressão e arrasto de fricção para o arrasto total em cada velocidade e nas várias profundidades testadas.	15
--	----

Lista de Acrónimos

A_p	Área de secção máxima do corpo
CAD	Desenho Assistido por Computador
C_D	Coeficiente de arrasto
D	Arrasto Hidrodinâmico
D_a	Arrasto activo
DCF	Dinâmica Computacional de Fluidos
D_p	Arrasto de pressão
D_p	Arrasto passivo
F	Força
Fr	Número de Froude
g	Aceleração da gravidade
L	Comprimento do nadador
m	Metro
m/s	Metro por segundo
N	Newton
Re	Número de Reynolds
TAC	Tomografia Axial Computorizada
v	Velocidade de nado
η	Viscosidade da água
ρ	Densidade da água

Introdução

Na modalidade de natação pura desportiva, o tempo total de nado é composto pelo somatório de três parciais: tempo de partida, tempo de nado e tempo de viragem (Guimarães & Hay, 1985). Podemos assim verificar que o deslize subaquático após as partidas e viragens assume uma elevada influência no rendimento final de uma prova de natação (Vilas-Boas et al., 2010).

Desta forma, o estudo do escoamento do fluido existente em redor do nadador durante as duas fases referidas (partidas e viragens), é importante para que possa haver uma melhoria na performance hidrodinâmica. Relativamente às partidas, mas, com aplicação também nas viragens, alguns autores (Cossor & Mason, 2001; Vilas-Boas et al., 2000) sugerem mesmo que, mais importante do que a posição de partida adoptada pelo nadador, é o seu alinhamento corporal na fase de deslize que vai determinar o sucesso na partida.

Tratando-se de um meio aquático, encontraremos três tipos de forças de arrasto hidrodinâmico (D), as quais se caracterizam por se oporem ao movimento do nadador: (i) arrasto de fricção, (ii) arrasto de forma ou pressão, e (iii) o arrasto de onda (Polodori et al., 2006; Toussaint et al., 2002).

Para permitir uma melhor performance, temos como objectivo minimizar o arrasto hidrodinâmico (não sendo excepção, as fases de partida e viragem) devendo o nadador adoptar uma posição o mais hidrodinâmica possível.

Vários autores (Lyttle et al., 2000; Marinho et al., 2009a) sugerem que uma forma de minimizar o arrasto hidrodinâmico passa por aumentar a profundidade do deslize subaquático, uma vez que a contribuição da componente de arrasto de onda parece diminuir quando os nadadores efectuem o seu deslocamento a maiores profundidades. A determinação do arrasto passivo durante o movimento subaquático em posição hidrodinâmica foi efectuada, recorrendo a métodos experimentais, por alguns investigadores como Clarys e Jiskoot (1975), Kolmogorov e Duplishcheva (1992) e Lyttle et al. (1999). Mais recentemente, outros, como Vennell et al. (2006), concluíram que para profundidades menores que 0.7 m o arrasto produzido pode ser 2.4 vezes superior do que para profundidades maiores que 0.7 m, sugerindo também que o arrasto de onda produzido é responsável por 50-60% do arrasto total. No entanto, existe ainda a necessidade de se estudar este facto, não só porque existem poucos estudos realizados, como também devido à variabilidade nos resultados obtidos pelos diferentes autores, revelando também algumas das dificuldades envolvidas na realização de tais protocolos experimentais (Bixler et al., 2007).

Na procura de soluções para este tipo de estudos, Bixler e Schloder (1996) mostraram que a aplicação de técnicas numéricas, de dinâmica computacional de fluidos (DCF), em natação podia ser uma alternativa aos estudos experimentais. Esta técnica de simulação numérica é actualmente uma das melhores ferramentas numéricas no campo da engenharia biomecânica (Marinho et al., 2009a). Esta ferramenta possibilita a simulação computacional do comportamento de fluidos, analisando e resolvendo problemas em que estes estão envolvidos. A possibilidade de obtenção de dados, não havendo necessidade de executar testes utilizando seres humanos, é uma enorme mais valia, não só em termos de custos associados, como também em termos de eficiência de tempo, dado que, a qualquer momento existe a possibilidade de efectuar uma nova simulação e alterar as variáveis, permitindo a comparação dos dados obtidos.

Neste sentido, temos como objectivo verificar o efeito da profundidade no arrasto hidrodinâmico de um nadador durante a fase de deslize subaquático, utilizando a dinâmica computacional de fluidos. Apresentamos como hipótese deste estudo, o arrasto hidrodinâmico diminuir com o aumento da profundidade de deslize.

Revisão da Literatura

O levantamento bibliográfico realizou-se através de pesquisa feita em contexto de biblioteca, nomeadamente na Internet, com recurso às bases de dados EBSCOhost.

Foram utilizados quatro conjuntos de *keywords* para balizar a pesquisa. Primeiramente, foi efectuada uma pesquisa por “drag”¹ (onde foram encontradas 1224 publicações desde 1937, havendo sido publicadas 656 desde 2000), devido à necessidade de caracterizar esta variável o melhor possível. A quantidade de resultados expressa o espectro de estudo para além da temática do arrasto que nos interessa neste trabalho, nomeadamente o arrasto hidrodinâmico. Neste sentido, e de forma a direccionar melhor a pesquisa, prosseguiu-se com uma pesquisa utilizando as palavras “drag & hydrodynamics”² (onde foram encontradas 114 publicações desde 1977, havendo sido publicadas 56 desde 2000). A principal variável que temos como referência para este trabalho é a profundidade. Neste sentido, verificou-se também os estudos realizados com “drag & depth”³, resultando apenas 13 publicações desde 1996. Por fim, mas não menos importante, pesquisaram-se estudos que tenham utilizado a dinâmica computacional de fluidos. Para isso foram utilizadas as palavras “*computational fluid dynamics*”⁴ (onde foram encontradas 125 publicações desde 1984, havendo sido publicadas 114 desde 2000, evidenciando a novidade do tema).

O Fluido

Novais-Barbosa (1985) define fluido como um corpo que experimenta deformações que vão aumentando indefinidamente, quando submetidos a esforços tangenciais, por mais pequenos que sejam. Assim sendo, um fluido é-o simplesmente porque escoar quando sujeito a forças externas. Dado isto, o fluido apresenta um determinado padrão de movimento, o qual se designa por fluxo (Toussaint et al. 2010).

A dinâmica de fluidos pode ser definida como a ciência que estuda o comportamento destes, utilizando três formas de a estudar: teórica, numérica e experimental. Cálculos teóricos (e.g., Larsen et al., 1981; Massey, 1989), soluções numéricas (e.g., Marinho et al., 2009a; 2009b; Silva et al., 2008) e aproximações experimentais (e.g., Hollander et al., 1986; Rennie et al., 1974; Taiar et al., 1999) têm sido usados para estudar as bases hidrodinâmicas em nadadores. Cálculos teóricos estão baseados na aplicação de mecanismos base do fluido e nas equações de

¹ Pesquisa realizada a 20 de Setembro de 2010

² Pesquisa realizada a 20 de Setembro de 2010

³ Pesquisa realizada a 20 de Setembro de 2010

⁴ Pesquisa realizada a 20 de Setembro de 2010

Newton para determinar as forças hidrodinâmicas, já as simulações numéricas consistem na simulação computacional do fluxo da água em torno do corpo humano. Relativamente às aproximações experimentais, várias tentativas foram feitas para aplicar tecnologia de forma a determinar estas forças (Hollander et al., 1986; Kolmogorov & Duplishcheva, 1992), como veremos de seguida (Marinho et al., 2010).

Arrasto Hidrodinâmico

A progressão na água depende da interacção de forças propulsivas e resistivas que actuam no corpo do nadador a uma dada velocidade (Sanders et al., 2001). No caso concreto do presente estudo, incidiremos a nossa atenção sobre a força de arrasto que se opõe ao deslocamento.

Podemos caracterizar o arrasto hidrodinâmico como uma força externa que actua sobre o corpo do nadador, com a mesma direcção mas sentido oposto ao vector de deslocamento. Desta forma, quanto menor for a sua intensidade, maior será a velocidade de deslocamento, obviamente, se as restantes condições se mantiverem constantes (Toussaint et al. 2010).

Arrasto

Quando um nadador se desloca próximo da superfície da água, este enfrenta três categorias de arrasto: arrasto de fricção, arrasto de pressão ou forma e arrasto de onda (Toussaint et al., 2002).

O arrasto de fricção representa o arrasto que é produzido como resultado da fricção entre a água e a superfície de um corpo em movimento, que aumenta linearmente com o aumento da velocidade de nado. A conjugação da área de superfície corporal, com o tipo de superfície, determina a quantidade de arrasto de fricção produzida. Os fatos de natação que foram introduzidos nas competições têm como objectivo principal diminuir este tipo de arrasto (Toussaint et al., 2000; Zatsiorsky, 2000).

A equação referente ao arrasto de fricção é dado por um valor chamado número de Reynolds (número escalar adimensional) (Toussaint et al., 2000):

$$Re = \frac{vL\rho}{\eta} \quad (1)$$

Onde:

ρ = densidade da água

η = viscosidade da água

v = velocidade de deslocamento

L = comprimento do nadador

O arrasto de pressão é produzido através de um diferencial de pressões existentes entre a retaguarda e a frente do nadador, variando com o quadrado da velocidade de deslocamento do deste. Este arrasto fornece informações sobre a qualidade da posição hidrodinâmica do nadador, uma vez que está diretamente relacionada com a área de secção transversal do mesmo (Toussaint et al., 2000; Zatsiorsky, 2000).

O arrasto de pressão de um nadador pode ser calculado pela seguinte equação (Toussaint et al., 2000):

$$D_p = \frac{1}{2} \rho A_p v^2 C_D \quad (2)$$

Onde:

ρ = densidade da água

C_D = coeficiente de arrasto

v = velocidade de deslocamento

A_p = área de secção máxima do corpo transversal à direcção da força

A secção transversal é um factor determinante do arrasto hidrodinâmico (Zamparo et al., 2009), assumindo especial importância na biomecânica da natação, principalmente na correção da técnica de nado. No caso do arrasto hidrodinâmico, a área de secção máxima do corpo corresponde em grande parte à área de projeção do corpo no seu plano transversal:



Figura 1. Representação esquemática da secção transversal.

O arrasto de onda ocorre quando a deslocação do nadador é feita à superfície ou perto desta, originando a criação de ondas, pelo facto de existirem dois meios com densidades distintas. O arrasto de onda parece ser o mais prejudicial das três componentes do arrasto, já que varia numa razão quadrática com a velocidade de nado (Toussaint et al., 2000; Zatsiorsky, 2000).

O arrasto de onda, quantificado pelo número de Froude (Fr , outro número adimensional) é dado pela equação:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}} \quad (3)$$

Onde:

v = velocidade de deslocamento

L = comprimento do nadador

g = aceleração da gravidade (9.81 m/s^2)

Vilas-Boas et al. (2001) refere que a contribuição das diferentes componentes para o arrasto total varia com a velocidade. Para baixas velocidades o papel principal no arrasto é atribuído ao arrasto de pressão enquanto que para velocidades mais elevadas o papel principal é desempenhado pelo arrasto de onda. Um trabalho conduzido por Toussaint et al. (2002) indica-nos que à velocidade de 1 m/s a contribuição relativa de cada componente para o arrasto total é aproximadamente 3% para o arrasto de fricção, 2% para o arrasto de onda e 95% para o arrasto de pressão. No entanto, se a velocidade aumentar para 2m/s, a contribuição relativa de cada componente corresponde a 3% para o arrasto de fricção, 20% para o arrasto de onda e 77% para o arrasto de pressão.

Coeficiente de Arrasto

A tradução numérica destes valores é definida como coeficiente de arrasto (C_D). O coeficiente de arrasto é uma grandeza adimensional que, ao depender dos números de Strouhal, Froude, Euler e Reynolds, expõe a dependência da força relativamente às variáveis independentes (ρ , v , A_p), sendo por sua vez função do comprimento do corpo L , da pressão (p), da aceleração da gravidade (g), do coeficiente de viscosidade do fluido (μ), bem como da forma e orientação do corpo relativamente às direções de deslocamento (Ribeiro, 2010).

Como foi referido, a força de arrasto varia com o quadrado da velocidade, no entanto, à medida que a velocidade aumenta o coeficiente de arrasto diminui. Poderemos entender esta situação analisando a fórmula do coeficiente de arrasto, que não é mais que a resolução da equação do arrasto de pressão (equação 1) em ordem a C_D , como poderemos verificar:

$$C_D = \frac{2D_p}{\rho A_p v^2} \quad (4)$$

Verificamos assim que o valor do coeficiente de arrasto diminui à medida que a velocidade aumenta.

Avaliação do Arrasto

Relativamente à avaliação do arrasto, esta pode ser dividida em duas categorias: arrasto passivo (D_p) com posição corporal fixa e arrasto activo (D_a) com movimento intersegmentar.

O arrasto passivo refere-se à quantidade de resistência da água que um corpo experimenta numa postura imóvel, enquanto que o arrasto activo refere-se à resistência da água associada com o movimento de nado (Kolmogorov et al., 1997).

Arrasto Passivo - Deslize Subaquático

A importância de estudar o arrasto passivo é facilmente entendida após analisar os dados que Chatard et al. (1990) demonstram no seu estudo, verificando que a fase de deslize após as partidas e as viragens corresponde entre 10-25% do tempo total da prova (dependendo da prova e da dimensão da piscina). Considerando o valor percentual, podemos admitir que a fase de deslize subaquático é um factor de rendimento em natação pura desportiva, onde se torna fundamental a redução do arrasto, devendo desta forma o nadador conseguir adoptar a posição mais hidrodinâmica possível (Guimarães & Hay, 1985). A posição mais indicada para realizar o deslize subaquático, denominada *streamline position* ou posição hidrodinâmica fundamental, passa por ter o corpo totalmente em extensão, com a cabeça entre os membros superiores, olhar dirigido para baixo, os membros superiores devem estar juntos em extensão (ombros flectidos), procurando colocar uma mão sobre a outra, os membros inferiores deverão permanecer juntos e em extensão, com os pés em flexão plantar e, se possível, sobrepostos (Guimarães & Hay, 1985).

Estes dados foram comprovados por Marinho et al. (2009a) após analisar o deslize na posição ventral, com os membros superiores em extensão superior (ombros flectidos) ($C_D \approx 0.4$) e com os membros superiores em extensão inferior ao longo do tronco ($C_D \approx 0.7$). Considerando os dados obtidos, é verificada a vantagem hidrodinâmica da primeira posição, sugerindo os autores que deve haver uma preocupação em realizar as partidas e viragens de bruços, privilegiando o primeiro deslize, com os membros superiores em extensão superior, em detrimento do segundo, efectuado com os membros superiores ao longo do corpo.

Por sua vez, Zaidi et al. (2008) recomendam que durante o deslize a cabeça esteja alinhada com corpo, dado que desta forma oferece menor resistência em comparação com a posição inferior ou elevada da cabeça. Os dados demonstram que com a cabeça alinhada com o eixo do corpo parece permitir uma melhor penetração na água durante as fases subaquáticas, induzindo um decréscimo no arrasto de pressão de 17-21%, para velocidades de 2.20 m/s e 3.10 m/s.

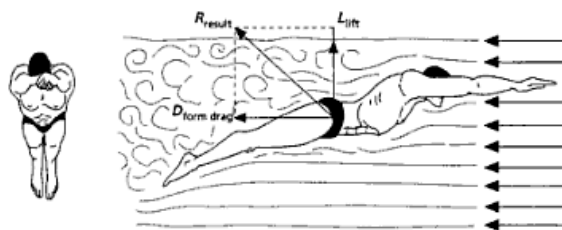


Figura 2. Resultante da combinação do arrasto e deslize. Adaptado de Vorontsov & Rummyantsev (2000).

Arrasto Hidrodinâmico e Profundidade

Ao diminuir a profundidade de um objecto, sujeito a um escoamento constante, a força de arrasto total aumenta devido ao aumento da contribuição da componente do arrasto de onda à superfície, como já foi demonstrado anteriormente. Para Toussaint et al. (2002), o arrasto de onda torna-se desprezível a profundidades que sejam três vezes superiores ao diâmetro do objecto mergulhado na água:

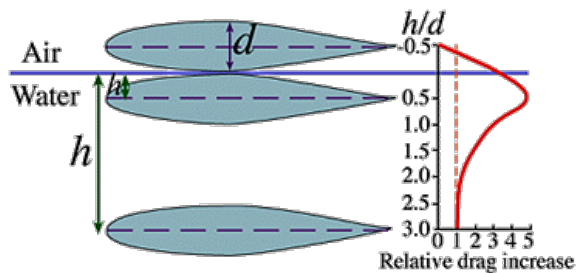


Figura 3. Efeito da profundidade no arrasto total (adaptado de Toussaint et al., 2002).

Lyttle et al. (1999) analisaram o impacto de duas diferentes velocidades (1.6 e 3.1 m/s) a quatro diferentes profundidades (0.6, 0.4 e 0.2 m e à superfície), durante o deslize subaquático. Os resultados demonstraram um decréscimo de 10-20% na força de arrasto quando os nadadores foram rebocados a uma profundidade de 0.4 e 0.6 m relativamente ao deslize à superfície, e uma redução de 7-14% quando rebocados a 0.2 m de profundidade. Não esquecendo que a profundidade ideal terá de ser aquela que permita diminuir ao máximo D mas que ao mesmo tempo permita uma distância vertical mínima da superfície para que o nado possa ser reiniciado. Os autores sugerem que para velocidades entre 1.6-1.9 m/s a profundidade óptima de deslize corresponde a 0.2 m de profundidade. Já para velocidades entre 1.9-3.1 m/s a profundidade deverá ser de 0.4 m.

Vennell et al. (2006), rebocaram um manequim em fibra de vidro para estudar o efeito do arrasto para velocidades compreendidas entre 0.4 e 2.6 m/s, a uma profundidade de 1.0 m até à superfície. As curvas de arrasto demonstraram que o arrasto total aumentava com a aproximação do manequim à superfície assim como com o aumento da velocidade. Mais uma vez se concluiu que o aumento do arrasto total se deve ao aumento da componente de arrasto de onda. Os autores concluíram ainda que, para uma velocidade de 2.2 m/s, a 0.6 m de profundidade, a componente de onda corresponde a 10% do arrasto hidrodinâmico total enquanto que à superfície corresponde a 50%. É ainda sugerido que para evitar o arrasto de onda os nadadores deverão realizar o deslize a uma profundidade de 2.8 vezes o diâmetro peitoral, para uma velocidade de 2.0 m/s, e 1.8 vezes o diâmetro peitoral, para uma velocidade de 0.9 m/s.

Componentes do Arrasto

Através da dinâmica computacional de fluidos, vários autores avaliaram o arrasto hidrodinâmico durante o deslize subaquático (Bixler et al., 2007; Zaidi et al., 2008; Marinho et al., 2009a; Ribeiro 2010) a 0.75 m, 0.9 m, 1.5 m de profundidade, respectivamente. Estes estudos apenas consideraram o arrasto de fricção e pressão, dado que os modelos se encontravam submersos, a uma profundidade em que se assumia que a componente do arrasto de onda era desprezível, à excepção de Ribeiro (2010). No primeiro estudo (Bixler et al., 2007) verificou-se uma contribuição de 75% da componente de pressão para o arrasto total e 25-27% na componente de fricção, para velocidades de 1.50 m/s e 2.25 m/s, respectivamente. Para o deslize subaquático com a cabeça alinhada com o corpo, o segundo estudo (Zaidi et al., 2008) refere uma contribuição de 80% da componente de pressão. O terceiro estudo (Marinho et al., 2009a) verificou que para a posição de deslize subaquático com os membros superiores em extensão superior, o arrasto de pressão representa 87%, enquanto que para a posição com os membros superiores em extensão inferior ao longo do tronco esta componente corresponde a 92%, apesar de em termos absolutos o valor do arrasto de fricção é praticamente o mesmo nas duas situações. Ribeiro (2010), por sua vez, usou as profundidades 0m, 0.1 m, 0.5 m e 0.9 m no seu estudo, com velocidades de 1.5 m/s, 2 m/s e 2.5 m/s. As conclusões do estudo foram de encontro às anteriores, onde o aumento da velocidade originou um aumento do arrasto hidrodinâmico em todas as profundidades. O valor de arrasto hidrodinâmico diminui também à medida que a profundidade aumenta, quando o nadador se encontra totalmente submerso.

Dinâmica Computacional de Fluidos

A dinâmica computacional de fluidos tem como base as equações de Navier-Stokes datadas de 1845, as quais explicam, matematicamente, o escoamento dos fluidos.

Neste sentido, a dinâmica computacional de fluidos poderá assumir-se como a ciência de predição do fluxo dos fluidos, transferência/conservação de calor, massa e energia, reações químicas e fenómenos relacionados, através da resolução de equações matemáticas, que governam estes processos (Yang et al., 2001).

Além da sua ampla possibilidades de aplicação, existe uma sequência tipo que deve ser seguida com o objectivo de não só obter uma resolução satisfatória, como de economizar tempo e recursos. Em temos esquemáticos, podemos representar essa sequência da seguinte forma:

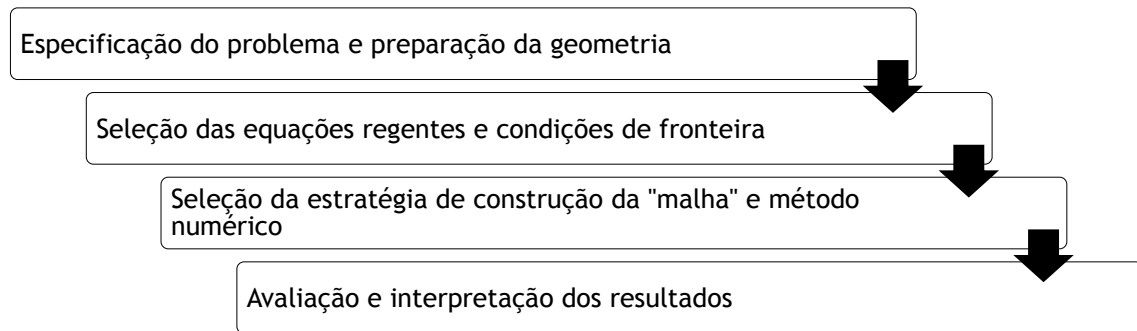


Figura 4. Esquema representativo da sequência de trabalho em DCF.

Estas fases, para aplicação desta metodologia, serão seguidas e detalhadas no capítulo dedicado aos Métodos utilizados para a consecução deste trabalho.

Métodos

Modelo Tridimensional

Para obter a geometria tridimensional do corpo do nadador, foi feita uma tomografia axial computadorizada (TAC) completa ao corpo de um nadador de elite. A TAC permitiu criar uma “nuvem de pontos” que representaria a forma do corpo do nadador. A superfície do corpo do nadador foi criada usando o programa GAMBIT®, um programa de modelagem geométrica desenvolvido pela ANSYS® (Canonsburg, Pennsylvania, U.S.A.), que providencia *software* sofisticado na área da dinâmica computacional de fluidos. Essa superfície foi então processada de forma a criar o volume da malha de pontos (*mesh*), antes desta ser importada para o programa de simulação numérica ANSYS® FLUENT® para se estabelecer as condições de simulação (Bixler et al., 2007).

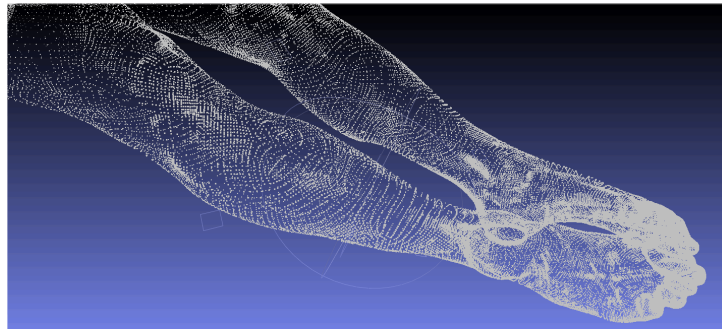


Figura 5. Nuvem de pontos obtida através da TAC.

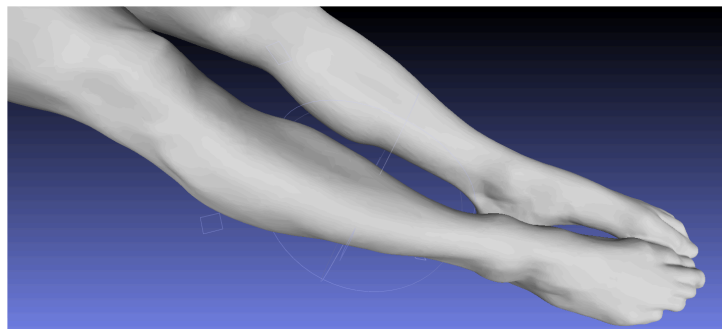


Figura 6. Modelo tridimensional do nadador, após a nuvem de pontos ter sido processada pelo *software* GAMBIT®.

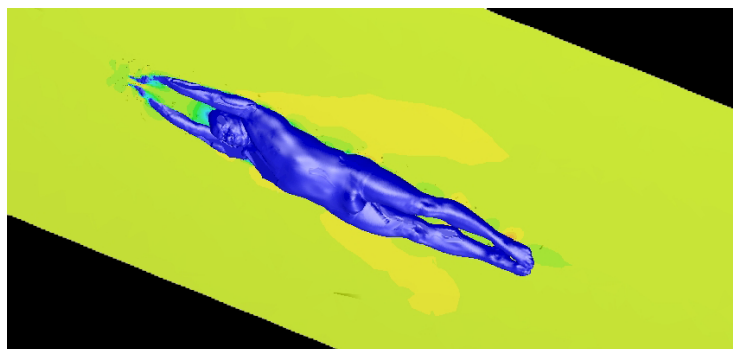


Figura 7. Modelo tridimensional do nadador.

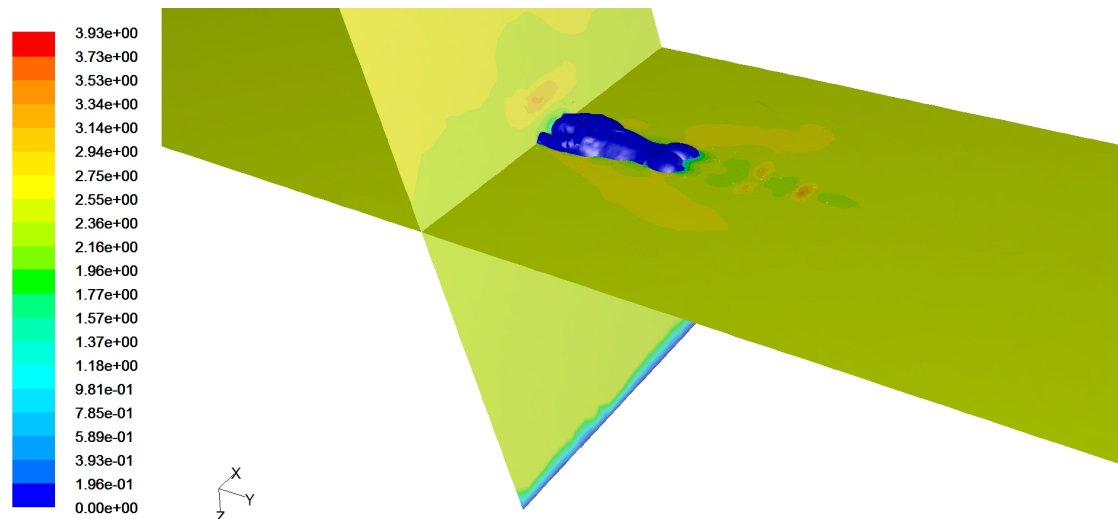
Modelo da Dinâmica Computacional de Fluidos

As condições da DCF foram estabelecidas de forma a representar a geometria e as condições de escoamento de parte de uma pista de uma piscina (Figuras 8). O ambiente a ser simulado foi o de uma piscina com 2 m de profundidade, 2 m de largura e 25 m de comprimento, onde o modelo tridimensional foi colocado na posição hidrodinâmica fundamental a 0 m, 0.25 m, 0.50 m, 0.75 m e 1 m de profundidade (linha média do corpo), variando em cada uma destas profundidades três velocidades representativas do deslize subaquático em natação, 1.5 m/s, 2 m/s e 2.5 m/s (Bixler et al., 2007). A análise da DCF foi efectuada com o modelo colocado numa posição horizontal ventral e com um ângulo de ataque de 0° .

Como forma de aproximar a simulação o mais possível à realidade, a temperatura da água foi definida em 28°C com uma densidade de 998.2 kg/m^3 e uma viscosidade de $0.001\text{ kg(m/s)}^{-1}$.



Figura 8. Domínio da simulação. Pista de uma piscina com 2 m de profundidade, 2 m de largura e 25 m de comprimento. Modelo a 1 m de profundidade.



Contours of Velocity Magnitude (mixture) (m/s)

Figura 9. Simulação do *software* ANSYS® FLUENT® com o modelo do nadador na posição de 0 m de profundidade. Representação dos valores de velocidade em ambiente ar/água, para uma velocidade de 2 m/s. Pontos/Zonas a vermelho indicam valores mais elevados de velocidade, enquanto os pontos/zonas a azul indicam valores mais baixos de velocidade de escoamento do fluido, no domínio considerado.

Avaliação das Componentes do Arrasto

Na natação, o arrasto total é composto pelo arrasto de fricção, arrasto de pressão e arrasto de onda (Marinho et al., 2009a). O arrasto de fricção é atribuído às forças que tendem a reduzir a fluidez da água ao longo da superfície do corpo. Esta depende da velocidade do fluxo, da superfície do corpo e das características dessa superfície. O arrasto de pressão, é causado pelo diferencial de pressão entre a retaguarda e a frente do nadador e é proporcional ao quadrado da velocidade de nado, à densidade da água e à área da secção transversal do nadador. Por fim, nadar perto da superfície da água origina a formação de ondas à superfície originando o arrasto de onda (Marinho et al., 2009a). Estas componentes do arrasto serão computorizadas pelo *software* ANSYS® FLUENT®. Contudo, por limitações da aplicação numérica, a componente do arrasto de onda não será considerada neste trabalho, assumindo-se que as alterações ao nível do arrasto de pressão, em função da profundidade, se devem a alterações ao nível da componente do arrasto de onda (Vennell et al., 2006).

Resultados

A tabela 1 apresenta os resultados obtidos nas simulações realizadas através do *software* ANSYS® FLUENT®, do modelo do nadador, para as diferentes profundidades (0, 0.25, 0.50, 0.75 e 1.0 m) e velocidades testadas (1.5, 2.0 e 2.5 m/s). São apresentados também os valores das componentes do arrasto de pressão e fricção, em valor absoluto e em percentagem do arrasto total. Os valores do arrasto total são referentes ao arrasto de pressão e arrasto de fricção.

Tabela 1. Valores de coeficiente de arrasto e força de arrasto para o arrasto total e contribuição do arrasto de pressão e arrasto de fricção para o arrasto total em cada velocidade e nas várias profundidades testadas.

	Arrasto Total		Arrasto de Pressão			Arrasto de Fricção		
	C_D	F Arrasto (N)	C_D	F Arrasto Force (N)	%	C_D	F Arrasto (N)	%
Profundidade = 0 m								
v = 1.5 m/s	0.625	52.04	0.538	44.83	86.13	0.087	7.22	13.87
v = 2.0 m/s	0.600	88.78	0.512	75.81	85.39	0.088	12.97	14.61
v = 2.5 m/s	0.519	120.18	0.460	106.47	88.59	0.059	13.71	11.41
Profundidade = 0.25 m								
v = 1.5 m/s	0.756	62.94	0.638	53.17	84.48	0.117	9.77	15.52
v = 2.0 m/s	0.662	98.04	0.555	82.16	83.81	0.107	15.88	16.19
v = 2.5 m/s	0.640	148.04	0.540	125.02	84.45	0.099	23.02	15.55
Profundidade = 0.50 m								
v = 1.5 m/s	0.692	57.64	0.577	48.10	83.43	0.115	9.55	16.57
v = 2.0 m/s	0.652	96.52	0.544	80.63	83.53	0.107	15.89	16.47
v = 2.5 m/s	0.632	146.16	0.532	123.13	84.24	0.100	23.03	15.76
Profundidade = 0.75 m								
v = 1.5 m/s	0.678	56.51	0.561	46.71	82.66	0.118	9.80	17.34
v = 2.0 m/s	0.636	94.21	0.529	78.33	83.14	0.107	15.88	16.86
v = 2.5 m/s	0.623	144.06	0.523	121.05	84.03	0.099	23.01	15.97
Profundidade = 1.0 m								
v = 1.5 m/s	0.672	56.01	0.555	46.27	82.60	0.117	9.75	17.40
v = 2.0 m/s	0.629	93.14	0.522	77.24	82.93	0.107	15.90	17.07
v = 2.5 m/s	0.618	142.95	0.518	119.94	83.90	0.099	23.01	16.10

Para facilidade de análise, nas figuras 10, 11, 12, 13, 14 e 15 podemos observar os dados acima apresentados, com a ilustração gráfica da variação dos parâmetros hidrodinâmicos em função da velocidade e profundidade analisadas.

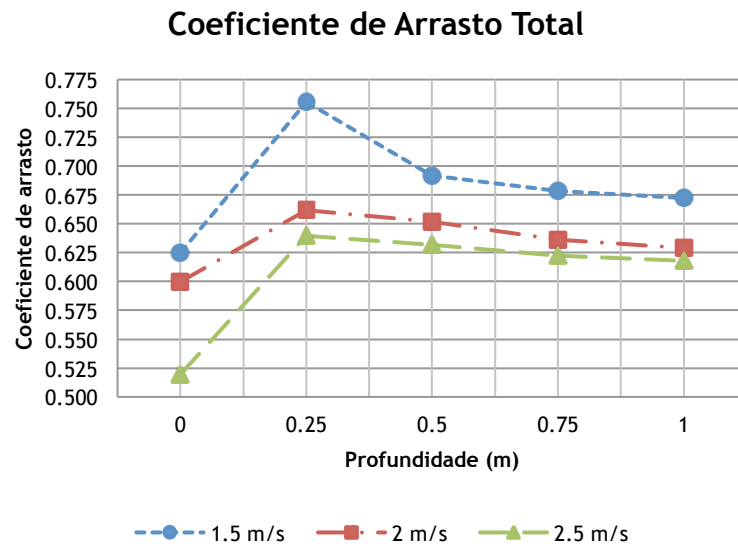


Figura 10. Representação gráfica do coeficiente de arrasto total em função da profundidade, para as velocidades de 1.5, 2 e 2.5 m/s.

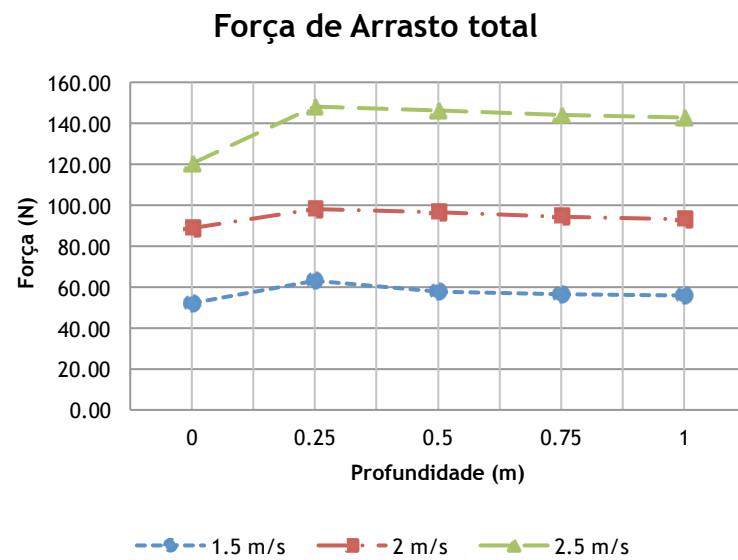


Figura 11. Representação gráfica da força de arrasto total em função da profundidade, para as velocidades de 1.5, 2 e 2.5 m/s.

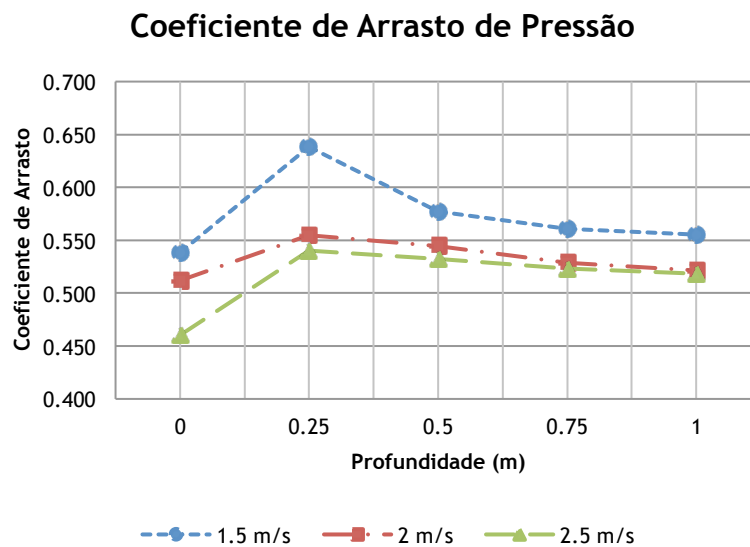


Figura 12. Representação gráfica do coeficiente de arrasto de pressão em função da profundidade, para as velocidades de 1.5, 2 e 2.5 m/s.

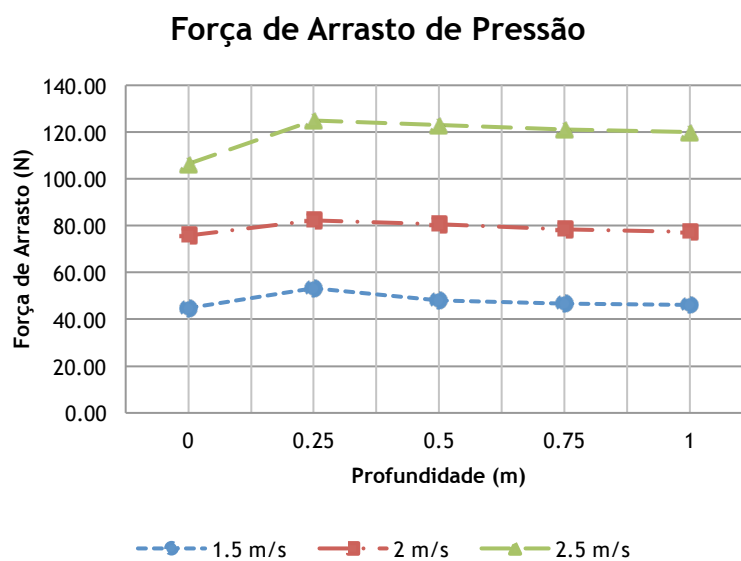


Figura 13. Representação gráfica da força de arrasto de pressão em função da profundidade, para as velocidades de 1.5, 2 e 2.5 m/s.

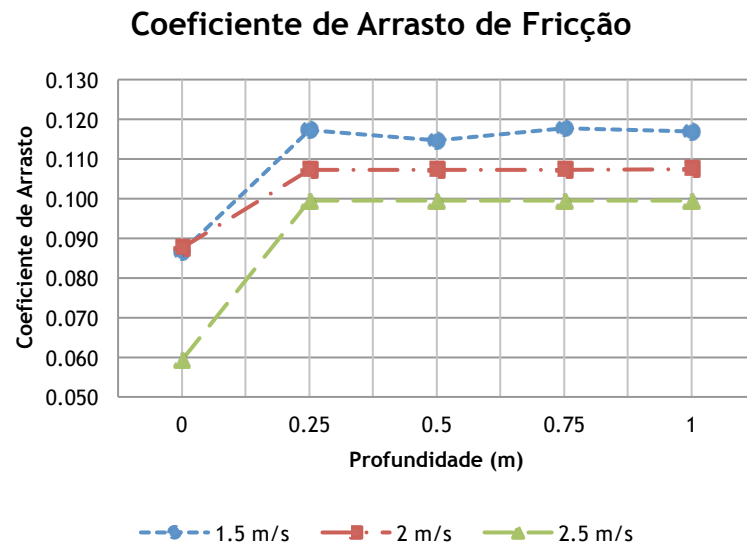


Figura 14. Representação gráfica do coeficiente de arrasto de fricção em função da profundidade, para as velocidades de 1.5, 2 e 2.5 m/s.

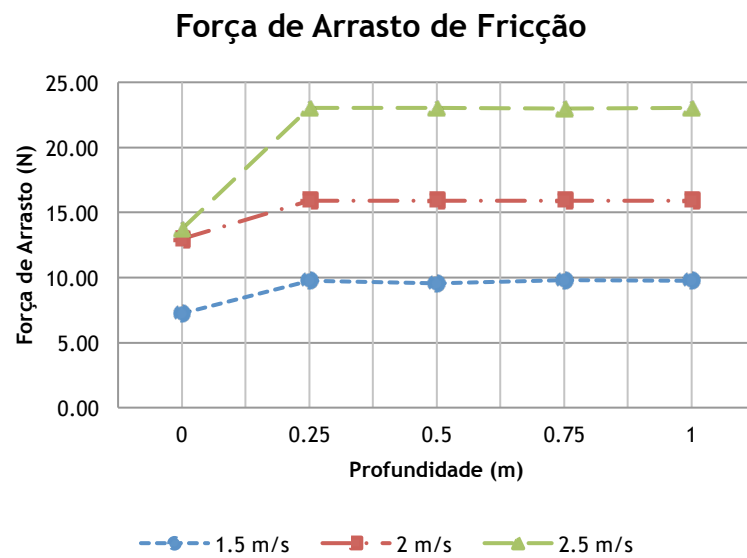


Figura 15. Representação gráfica da força de arrasto de fricção em função da profundidade, para as velocidades de 1.5, 2 e 2.5 m/s.

De uma forma geral, é possível verificar que para todas as velocidades, o arrasto hidrodinâmico diminui com o aumento da profundidade, verificando-se uma tendência para a estabilização do valor de arrasto a partir dos 0.75 m. Como exemplo, a redução do arrasto hidrodinâmico entre os 0.25 m e os 1 m de profundidade para a velocidade de 1.5 m/s é de aproximadamente 11%. De notar ainda que para a simulação feita com a linha média do corpo do nadador colocada a 0 m de profundidade, existindo assim ambientes diferentes (ar e água) e devido às diferenças em termos de viscosidade e densidade do ar, o coeficiente de arrasto e a força de arrasto para as três velocidades foram substancialmente mais baixos, mesmo quando comparados com a simulação efectuada a 1.0 m de profundidade. Verifica-se também que a velocidade influencia o arrasto hidrodinâmico, verificando-se um aumento da força de arrasto e uma diminuição do coeficiente de arrasto com o aumento da velocidade.

Discussão

O principal objectivo deste trabalho foi avaliar o efeito da profundidade no arrasto hidrodinâmico (D), através da utilização da dinâmica computacional de fluidos. Os principais dados encontrados revelaram que o arrasto hidrodinâmico diminui com o aumento da profundidade de deslize subaquático.

Segundo os dados obtidos, o arrasto hidrodinâmico (D) diminui à medida que a profundidade aumenta, indo esta conclusão de acordo com o que é descrito na literatura (Bixler et al., 2007; Lyttle et al., 1999; Marinho et al., 2009a; Ribeiro 2010; Vennell et al., 2006; Zaidi et al., 2008).

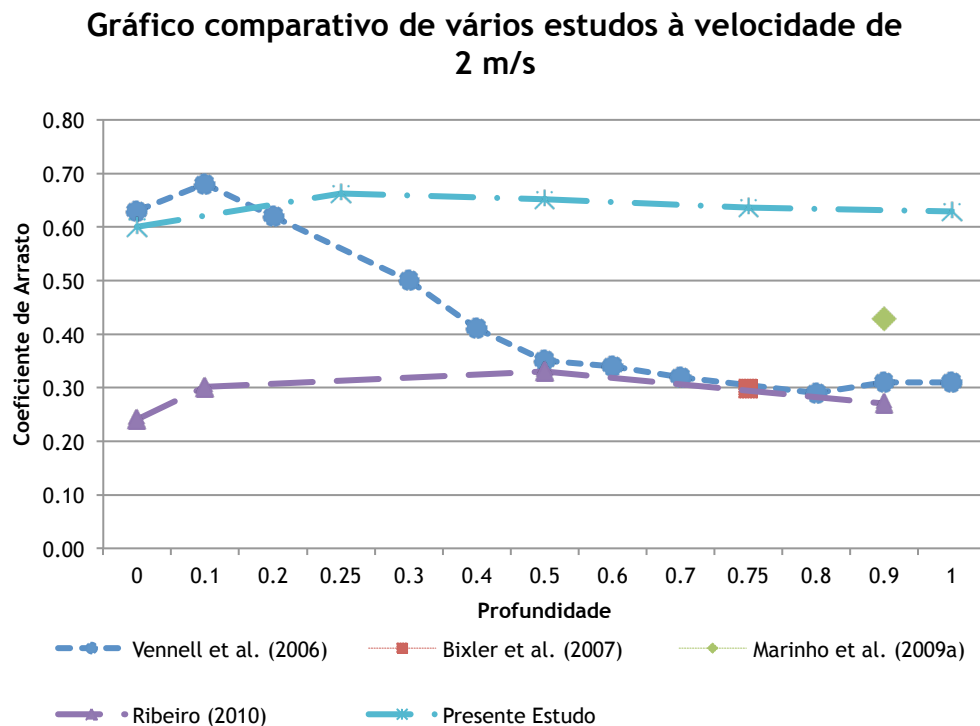


Figura 16. Representação gráfica do coeficiente de arrasto em função da profundidade, para a velocidades 2 m/s, em cinco diferentes estudos, Vennell et al. (2006), Bixler et al. (2007), Marinho et al. (2009a), Ribeiro (2010) e no presente estudo.

Através da análise do gráfico (figura 16), onde apenas existe variação na profundidade, sendo apresentado os dados apenas para a velocidade de 2 m/s, podemos verificar que existem diferenças quanto aos valores do coeficiente de arrasto entre os diversos estudos. Vennell et al.

(2006) efectuaram medições experimentais, das quais obtiveram uma grande variação no arrasto alterando a profundidade, isto é, aos 0.1 m de profundidade obtiveram um valor de coeficiente de arrasto de 0.68 enquanto que para a profundidade de 0.8 m o valor do coeficiente de arrasto foi menos de metade, 0.29. Bixler et al. (2007), num estudo utilizando a dinâmica computacional de fluidos, determinaram um valor de coeficiente de arrasto para a profundidade de 0.75 m de 0.30, estando assim na mesma linha dos dados apresentados por Vennell et al. (2006). Num estudo mais recente levado a cabo por Ribeiro (2010), nota-se não haver uma redução tão acentuada do arrasto com a profundidade. A principal diferença observa-se nos valores do coeficiente de arrasto para profundidades menores. No entanto, os valores do coeficiente de arrasto para profundidades maiores vão de encontro ao estudo experimental. Marinho et al. (2009a) apresentam no seu estudo um valor de coeficiente de arrasto relativamente superior aos até agora analisados, para uma profundidade de 0.9 m, para a qual o coeficiente de arrasto encontrado foi de 0.43, ao invés do valor aproximado de 0.30 sugerido pelos outros estudos. Numa comparação com os resultados obtidos para 1.0 m de profundidade e para os 2 m/s, obtivemos um valor de coeficiente de arrasto de 0.629, notando aqui uma variação de 0.195 pontos no valor do coeficiente de arrasto (23.67% de variação). No presente estudo, os valores comportam-se de forma idêntica aos sugeridos por Ribeiro (2010), apesar dos valores do coeficiente de arrasto se apresentarem algo superiores. Porém, os valores encontrados no presente trabalho são bastante aproximados, para profundidades menores, ao estudo experimental de Vennell et al. (2006). Pelos dados acima descritos pode verificar-se que existe uma tendência semelhante para a variação do arrasto com a profundidade entre o presente estudo e os restantes, apesar de algumas diferenças encontradas, que reflectem algumas diferenças que ainda se encontram entre dados numéricos e dados experimentais (Bixler et al., 2007). Relativamente às diferenças entre os vários estudos de simulação numérica apresentados, estas diferenças podem ser devidas ao modelo tridimensional utilizado, que não foi o mesmo em todos os estudos, bem como à metodologia utilizada para a obtenção deste. É preciso ter em conta que existem diferentes formas de obtenção do modelo tridimensional. No presente estudo optou-se pela utilização de uma TAC para obtenção da nuvem de pontos, enquanto no estudo de Marinho et al. (2009a), o modelo foi moldado por desenho assistido por computador (CAD), e Bixler et al. (2007) recorreram à utilização de um *scan* com laser.

Outro factor a considerar refere-se à posição em que as mãos se encontram no modelo. Numa situação de deslize subaquático, a posição hidrodinâmica fundamental sugere a colocação das mãos sobrepostas uma sobre a outra. Devido a questões de protocolo na obtenção do modelo tridimensional, as mãos do modelo encontram-se lado a lado e ligeiramente afastadas. Vorontsov & Rumyantsev (2000) (figura 17) referem que para uma posição na qual as mãos se encontram lado a lado, a força de arrasto hidrodinâmico poderá ser superior 7% à verificada numa posição na

qual as mãos se encontram sobrepostas, o que é mais um aspecto que pode explicar algumas das diferenças encontradas.

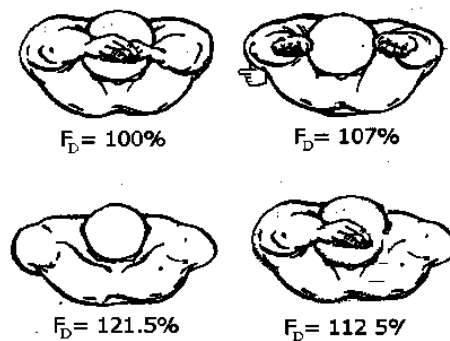


Figura 17. Variação percentual da força de arrasto hidrodinâmico em diferentes posições de deslize subaquático. Adaptado de Vorontsov & Rumyantsev (2000).

Relativamente à variação do arrasto com a profundidade, verifica-se uma tendência de diminuição do arrasto, nas três diferentes velocidades, para quatro das profundidades analisadas (0.25, 0.50, 0.75 e 1.0 m). Verifica-se também uma tendência para a manutenção do valor de arrasto após os 0.75 m de profundidade. Este dado vai, mais uma vez, de encontro com a literatura, a qual refere que após os 0.6 m de profundidade, o arrasto de onda é quase desprezível, influenciando assim o valor do arrasto total (Lyttle et al., 1999; Vennell et al., 2006). A expectativa de que o arrasto aumentasse com a velocidade, para a mesma profundidade, é também comprovada, com o conseqüente decréscimo do valor do coeficiente de arrasto. Esta relação inversa entre o coeficiente de arrasto e a velocidade vai de encontro ao verificado em estudos experimentais com corpos humanos totalmente submersos (Jiskoot & Clarys, 1975; Lyttle et al., 2000). Ao haver um aumento da velocidade, para a mesma profundidade, o coeficiente de arrasto diminui, registando-se o aumento da força de arrasto.

Contudo, para a profundidade de 0 m, os dados diferem dos restantes, já que, sendo a linha média do nadador o ponto de referencia para o valor de profundidade a analisar, este encontra-se apenas com metade do corpo submerso, justificando a variação dos valores para esta profundidade. Neste sentido, todos os valores de arrasto são menores, já que existe uma menor área de contacto com a água.

Relativamente às componentes do arrasto, os valores do arrasto de fricção são praticamente iguais (para uma velocidade de 2 m/s obteve-se um valor constante de coeficiente de arrasto, em todas as profundidades, excepto para os 0 m, de 0.107). Considerando que o arrasto de fricção é produzido mediante a maior ou menor área de superfície em contacto com a

água, este valor não iria sofrer grandes oscilações, já que o modelo utilizado foi o mesmo e o nadador encontra-se totalmente submerso. Vennell et al. (2006) sugerem também esta explicação. Para profundidades até aos 0.4 m, verificaram que o manequim tinha partes do corpo fora de água, o que iria afectar o arrasto de fricção e também o arrasto de pressão, uma vez que a secção transversa do corpo iria ser menor. Além de haver este benefício, é necessário quantificar o arrasto de onda, sendo que, para haver ganhos em termos de arrasto de fricção e de pressão, irá, possivelmente, implicar um maior arrasto de onda, o que no presente estudo não pode ser analisado, pela impossibilidade de diferenciar numericamente o valor do arrasto de onda, situação que urge solucionar em estudos futuros. Os valores de coeficiente de arrasto de pressão são idênticos em função da profundidade (para uma velocidade de 2 m/s obteve-se, em todas as profundidades, excepto para os 0 m, um intervalo de [0.555;0.522]). Tal facto deve-se à área de secção transversa a simular ser sempre a mesma, logo, o valor tenderá a ser idêntico. Todavia, em nosso entender, apenas não é totalmente idêntica porque a componente do arrasto de onda encontra-se possivelmente reflectida no arrasto de pressão, o que faz variar o seu valor. Esta conclusão poderá ser entendida em termos numéricos pela análise da fórmula do arrasto de pressão (equação 2), já que, utilizando o mesmo modelo, o único valor que irá variar será a velocidade. Marinho et al. (2009a), para uma profundidade de 0.9 m e com uma variação de velocidade entre dos 1.6 aos 2.0 m/s obteve uma variação do coeficiente de arrasto de pressão de [0.758;0.677], respectivamente.

Apesar de haver limitações ao nível da apresentação do valor de arrasto de onda, limitação esta colocada pelo próprio *software* utilizado, os dados obtidos são bastante importantes para a progressão de futuros estudos neste domínio, visto que a utilização da dinâmica computacional de fluidos aplicada ao desporto ser algo bastante recente. Dos estudos experimentais com manequins (Vennell et al., 2006) passamos a estudos utilizando simulações computadorizadas com modelos tridimensionais moldados por CAD (Marinho et al., 2009a; Ribeiro 2010), chegando a modelos tridimensionais reais, obtidos através de *scans* aos corpos de nadadores (Bixler et al., 2007), obtendo assim um modelo anatómico exacto. Na mesma linha de progresso, os vários estudos anteriores de outros autores apenas avaliam o arrasto passivo. Esta é uma limitação que se pretende ultrapassar. No entanto, mais uma vez, deparamo-nos com uma limitação a nível de *software* já que existe a necessidade de utilização de vários programas para o tratamento da *mesh*, os quais, na sua maior parte das vezes, não possibilitam a gravação dos ficheiros em extensões reconhecidas pelos programas de simulação. A animação do modelo tridimensional é assim um objectivo a curto prazo, difícil de executar mas exequível, que possibilitará uma análise do arrasto activo. A avaliação deste parâmetro revela-se de especial importância na medida em que o tempo no qual o nadador passa numa situação de arrasto

passivo é bastante curto, considerando o tempo total do deslize subaquático, necessitando haver alguma precaução na transposição dos resultados do arrasto passivo para o arrasto activo.

Aprofundar o estudo sobre o deslize subaquático poderá trazer vantagens em termos de tempos de nado, uma vez que, com a obtenção de um valor ideal para o deslize subaquático de um dado nadador, este em treino, poderá ajustar a profundidade na qual desliza. Após o fornecimento deste dado ao treinador, este terá em seu poder um dado concreto e útil para melhorar os tempos do seu nadador. Com o melhoramento informático que este tipo de estudo apresenta, poderemos, num futuro breve, proceder à obtenção do modelo tridimensional de um nadador com processos relativamente simples, realizar as simulações e fornecer dados ao treinador num tempo bastante curto.

Sugere-se que sejam efectuados mais estudos neste campo e que se possam realizar simulações com vários nadadores. A necessidade de um maior número de estudos neste campo de aplicação é notória e algo expectável, tendo em consideração a novidade que é o tema. Outra sugestão passa por efectuar estudos com um maior número de profundidades, nomeadamente profundidades após 1 m, já que muito poucos estudos apresentam dados para profundidades superiores a este valor. Perspectiva-se também a possibilidade de executar simulações para o arrasto activo, através da animação do modelo, de forma a obter valores de arrasto de uma situação de deslize subaquático completo. Para além disso, tal como acima referido, a inclusão dos valores do arrasto de onda deve ser um aspecto decisivo a considerar.

Como conclusão, é possível referir que o arrasto hidrodinâmico diminui à medida que a profundidade aumenta, verificando uma tendência para a estabilização deste valor a partir dos 0.75 m de profundidade. Estes dados parecem sugerir que a selecção da profundidade adequada para a realização do deslize subaquático deve ser uma preocupação central dos nadadores e treinadores. No entanto, a profundidade ideal terá de ser aquela que permita diminuir ao máximo o arrasto hidrodinâmico, mas, que ao mesmo tempo, permita uma distância vertical mínima da superfície para que o nado possa ser reiniciado, sendo esse equilíbrio entre diminuição do arrasto (aumentando a profundidade) e aumento da distância vertical percorrida um aspecto central a considerar.

Referências Bibliográficas

1. Bixler, B., Pease, D., & Fairhurst, F. (2007). The accuracy of computational fluid dynamics analysis of the passive drag of a male swimmer. *Sports Biomechanics*, 6(1), 81-98.
2. Bixler, B.S., & Schloder, M. (1996). Computational fluid dynamics: an analytical tool for the 21st century swimming scientist. *Journal of Swimming Research*, 11, 4-22.
3. Chatard, J., Bourgoïn, B., & Lacour, J. (1990). Passive drag is still a good evaluator of swimming aptitude. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 59(6), 399-404.
4. Clarys, J.P., & Jiskoot, J. (1975). Total resistance of selected body positions in the front crawl. In J.P. Clarys, & L. Lewillie (Eds.), *Swimming II* (pp. 110-117). Baltimore, U.S.A.: University Park Press.
5. Cossor, J., & Mason, B. (2001). Swim start performances at the Sydney 2000 Olympic Games. In J. Blackwell & R. Sanders (Eds.), *Proceedings of Swim Sessions of the XIX Symposium on Biomechanics in Sports* (pp. 70-74). San Francisco: University of San Francisco.
6. Guimarães, A., & Hay, J. (1985). A Mechanical Analysis of the Grab Starting Technique in Swimming. *International Journal of Sport Biomechanics*, 1(1), 25-35.
7. Hollander, A.P., de Groot, G., van Ingen Schenau, G.J., Toussaint, H.M., de Best, H., Peeters, W., Meulemans, A., & Schreurs, A.W. (1986). Measurement of active drag forces during swimming. *Journal of Sports Sciences*, 4, 21-30.
8. Kolmogorov, S., & Duplishcheva, O. (1992). Active drag, useful mechanical power output and hydrodynamic force coefficient in different swimming strokes at maximal velocity. *Journal of Biomechanics*, 25(3), 311-318.
9. Kolmogorov, S., Rumyantseva, O., Gordon, B., & Cappaert, J. (1997). Hydrodynamic characteristics of competitive swimmers of different genders and performance levels. *Journal of Applied Biomechanics*, 13(1), 88-97.
10. Larsen, O.W., Yancher, R.P., & Baer, C.L.H. (1981). Boat design and swimming performance. *Swim. Tech*, 18(2), 38-44.
11. Lyttle, A., Blanksby, B., Elliott, B., & Lloyd, D. (1999). Optimal depth for streamlined glidding. In K.L. Keskinen, P.V. Komi & A. P. Hollander (Eds.), *Biomechanics and Medicine in Swimming VIII* (pp. 165-170). Jyväskylä: Gummerus Printing.

12. Lyttle, A., Blanksby, B., Elliot, B., & Lloyd, D. (2000). Net forces during tethered simulation of underwater streamlined gliding and kicking technique of the freestyle turn. *Journal of Sports Sciences*, 18, 801-807.
13. Marinho, D.A., Barbosa, T.M., Costa, M.J., Figueiredo, C., Reis, V.M., Silva, A.J., & Marques, M.C (2010). Can 8 weeks of training affect active drag in young swimmers?. *Journal of Sports Science and Medicine*, 9(1), 71-78.
14. Marinho, D., Reis, V., Alves, F., Vilas-Boas, J., Machado, L., & Silva, A. (2009a). Hydrodynamic Drag During Gliding in Swimming. *Journal of Applied Biomechanics*, 25(3), 253-257.
15. Marinho, D.A., Rouboa, A.I., Alves, F.B., Vilas-Boas, J.P., Machado, L., Reis, V.M. & Silva, A.J. (2009b). Hydrodynamic analysis of different thumb positions in swimming. *Journal of Sports Science and Medicine*, 8(1), 58-66.
16. Massey, B.S. (1989). *Mechanics of Fluids*. London, England: Chapman & Hall.
17. Novais-Barbosa, J. (1985). *Mecânica dos fluidos e hidráulica geral*. Porto, Portugal: Porto Editora.
18. Polidori, G., Taiar, R., Fohanno, S., Mai, T., & Lodini, A. (2006). Skin-friction drag analysis from the forced convection modeling in simplified underwater swimming. *Journal of Biomechanics*, 39(13), 2535-2541.
19. Rennie, D.W., Pendergast, D.R., & di Prampero, P.E. (1975). Energetics of swimming man. In J.P. Clarys & L. Lewillie (Eds.), *Swimming II* (pp. 97-104). Baltimore, U.S.A.: University Park Press.
20. Ribeiro, J. (2010). Avaliação do efeito da profundidade no arrasto hidrodinâmico durante o deslize subaquático. *repositorio-aberto.up.pt* .
21. Sanders, R., Rushall, B., Toussaint, H., Stager, J., & Takagi, H. (2001). Bodysuit yourself, but first think about it. *Am. Swimming Magazine*, 5, 23-32.
22. Silva, A.J., Rouboa, A., Moreira, A., Reis, V., Alves, F., Vilas-Boas, J.P., & Marinho, D. (2008). Analysis of drafting effects in swimming using computational fluid dynamics. *Journal of Sports Science and Medicine*, 7(1), 60-66.
23. Taiar, R., Sagnes, P., Henry, C., Dufour, A.B., & Rouard, A.H. (1999). Hydrodynamics optimization in butterfly swimming: *position, drag coefficient and performance*. *Journal of Biomechanics*, 32, 803-810.
24. Toussaint, H. M., Hollander, A. P., Berg, C.V.D., & Vorontsov, A. (2000). Biomechanics of swimming. In W. E. Garrett & D. T. Kirkendall (Eds.), *Exercise and Sport Science* (pp. 639-660). Philadelphia, U.S.A.: Lippincott Williams & Wilkins.

25. Toussaint, H., Truijens, M., Elzinga, M.-J., De Ven, A., De Best, H., & Snabel, B (2002). Effect of a Fast-skin™ 'Body' Suit on Drag during Front Crawl Swimming. *Sports Biomechanics*, 1(1), 1.
26. Vennell, R., Pease, D., & Wilson, B. (2006). Wave drag on human swimmers. *Journal of Biomechanics*, 39(4), 664-671.
27. Vilas-Boas, J., Costa, L., Fernandes, R., Ribeiro, J., Figueiredo, P., & Marinho, D. (2010). Determination of the Drag Coefficient During the First and Second Gliding Positions of the Breaststroke Underwater Stroke. *Journal of Applied Biomechanics*, 26(3), 324-331.
28. Vilas-Boas, J.P., Cruz, M.J., Sousa, F., Conceição, F., & Carvalho, J.M. (2000). Integrated kinematic and dynamic analysis of two track-start techniques. In R. Sanders, & Y. Hong (Eds.), *Proceedings of the XVIII International Symposium on Biomechanics in Sports, Applied Program - Application of Biomechanical Study in Swimming* (pp. 113-117). Hong Kong: The Chinese University Press.
29. Vilas-Boas, J., Fernandes, R., & Kolmogorov, S. (2001). Arrasto hidrodinâmico activo e potência mecânica máxima em nadadores pré-juniores de Portugal. *Revista Portuguesa de Ciencias do Desporto*, 1(3), 14-21.
30. Vorontsov, A.R., & Rumyantsev, V.A. (2000). Resistive forces in swimming. In V.M. Zatsiorsky (Eds.), *Biomechanics in Sport: Performance Enhancement and Injury Prevention* (pp. 184-204). Oxford, England: Blackwell.
31. Yang, C., Demokritou, P., Chen, Q., & Spengler, J. (2001). Experimental validation of a computational fluid dynamics model for IAQ applications in ice rink arenas. *Indoor Air*, 11(2), 120-126.
32. Zaidi, H., Taiar, R., Fohanno, S., & Polidori, G. (2008). Analysis of the effect of swimmer's head position on swimming performance using computational fluid dynamics. *Journal of Biomechanics*, 41(6), 1350-1358.
33. Zamparo, P., Gatta, G., Pendergast, D., & Capelli, C. (2009). Active and passive drag: the role of trunk incline. *European Journal of Applied Physiology*, 106(2), 195-205.
34. Zatsiorsky, V. (2000). *Biomechanics in sport: performance enhancement and injury prevention*. Oxford, England: Blackwell Science.